

Operationsverstärker-Schaltung

Stromausgleich zwischen LED-Strings optimieren

Kommen mehrere LED-Strings zum Einsatz, trägt die Current-Balancing-Schaltung dazu bei, dass in allen Strings der gleiche Strom fließt. Allerdings weist sie Nachteile bei der Leistungsfähigkeit auf. Der folgende Artikel vergleicht die Leistungsfähigkeit dieser Schaltung mit einer Implementierung auf Basis von Operationsverstärkern.

Sanjeev Manandhar

Wenn in Kfz-Anwendungen mehrere LED-Strings zum Einsatz kommen, wie in Brems- oder Rückleuchten, sorgen Current-Balancing-Schaltungen dafür, dass in allen LED-Strings der gleiche Strom fließt. Unterschiede in der Helligkeit lassen sich so vermeiden. Für diesen Zweck ist die traditionelle Current-Balancing-Schaltung auf Basis diskreter Transistoren verbreitet. Sie hat den Vorteil, dass sie einfach ist und mit wenigen Bauelementen auskommt. Allerdings müssen dafür in Hinsicht auf die Leistungsfähigkeit Nachteile in Kauf genommen werden. Zum Beispiel können Unterschiede bei den Basis-Emitter-Spannungen (V_{BE}) der Transistoren und den Vorwärtsspannungen der LEDs sowie temperaturbedingte Änderungen zu unterschiedlich hell leuchtenden LED-Strings führen.

In der in **Bild 1** gezeigten Schaltung wird eine konstante Spannung ($VS1$) zusammen mit einem Widerstand ($R1$) und einem als Diode konfigurierten bipolaren NPN-Transistor ($T1$) zur Festlegung des Referenzstroms (I_{REF}) benutzt. I_{REF} wiederum wird über die Transistoren $T2$ und $T3$ als I_{1LED} bzw. I_{2LED} gespiegelt. Gleichung 1 gibt die Ströme in den Transistoren an. Im Idealfall sind I_{REF} , I_{1LED} und I_{2LED} gleich:

$$I_{REF} = V_{REF} / R1 = VS1 - VT1_{BE} / R1 \quad (1)$$

Die Basis-Emitter-Spannung des Transistors $T1$ ($VT1_{BE}$) kann bei gegebenem Strom erheblichen prozess- und temperaturbedingten Schwankungen unterliegen. In der vorliegenden Schaltung fließt

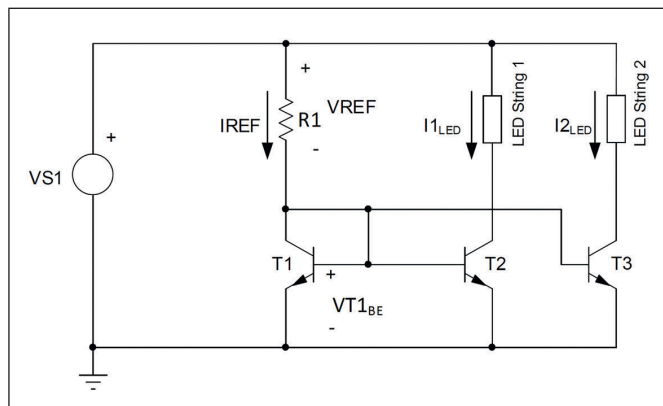


Bild 1: Vereinfachtes Schaltbild einer Current-Balancing-Schaltung auf der Basis diskreter Transistoren.

© Texas Instruments

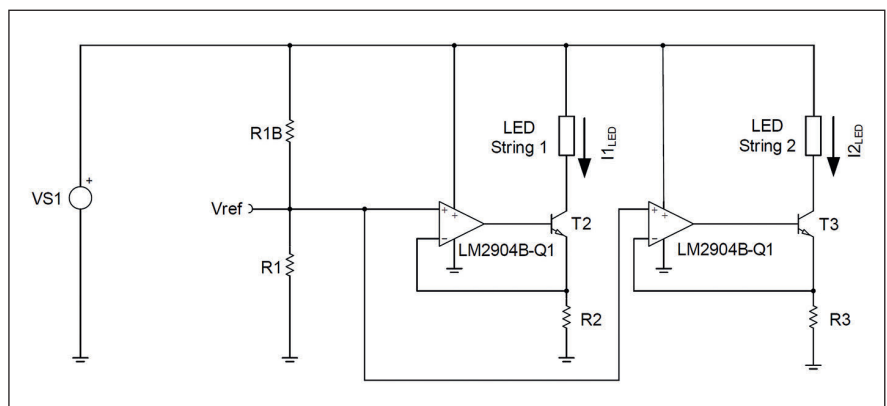


Bild 2: Die Current-Balancing-Schaltung auf Basis von Operationsverstärkern führt eine high-seitige Spannung an einen Stromwandler, um die LEDs mit einem konstanten Strom zu versorgen. © Texas Instruments

der Strom durch drei Zweige, von denen nur zwei über LED-Strings führen. Der durch $T1$ fließende Strom, der mehrere Milliampere betragen kann, dient lediglich dazu, I_{REF} festzulegen und verursacht somit Verluste, die unnötig sind. **Bild 2** zeigt als Alternative eine Current-Balancing-Schaltung auf Operationsverstärker-

Basis. Die Referenzspannung (V_{REF}) wird hier mit dem aus $R1$ und $R1B$ gebildeten Spannungsteiler aus $VS1$ erzeugt, und die Stromregelung erfolgt durch Rückführung der an den Strommess-Widerständen $R2$ und $R3$ abfallenden Spannungen an die invertierenden Eingänge des Doppel-Operationsverstärkers

LM2904B-Q1. Die Ströme in den Transistoren T2 und T3 errechnen sich wie folgt:

$$I_{1LED} = I_{2LED} = V_{REF}/R2 = VS1/R2 \times R1/(R1+R1B) \quad (2)$$

Dabei sind R2 und R3 gleich. I_{1LED} und I_{2LED} hängen von den Widerstands-Toleranzen und den Temperaturdrift-Koeffizienten der Widerstände R1, R1B, R2 und R3 ab. Durch den Einsatz von Präzisionswiderständen lassen sich die Auswirkungen der Toleranz und der Temperaturdrift der Widerstände minimieren. Zudem wird so eine bessere Stromanpassung über prozess- und temperaturbedingte Änderungen erreicht als mit einer auf diskreten Transistoren beruhenden Lösung. Weil der Strom – anders als bei der Schaltung mit diskreten Transistoren – durch V_{REF} bestimmt wird, lässt sich der durch R1 und R1B fließende Strom durch Anheben der Widerstandswerte reduzieren, wodurch auch die Verluste minimiert werden.

Einflüsse auf den LED-Strom

Als nächstes vergleicht man, wie sich Unstimmigkeiten zwischen den Eigenschaften der Bauelemente sowie Temperatur- und Stromversorgungs-Effekte bei den Schaltungsvarianten auswirken.

- Unterschiedliche Basis-Emitter-Spannungen der NPN-Transistoren können trotz gleicher Ströme entstehen, wenn die Transistoren unterschiedlichen Fertigungslosen entstammen oder verschiedene Emittterflächen sowie Temperaturen aufweisen,
- in der Leiterplatte an den Stellen, an denen sich die Transistoren befinden, mechanische Spannungen existieren oder
- Unterschiede bei den Basiswiderständen oder Basisströmen der NPN-Transistoren bestehen.

Die Unterschiede bei den V_{BE} -Werten wirken sich auf die in den einzelnen LED-Strings fließenden Ströme aus. Die Basis-Emitter-Spannung eines bipolaren Transistors kann eine Temperaturdrift von bis zu $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ aufweisen. Folglich kann eine 10°C betragende Temperaturdifferenz zwischen zwei Transistoren eine um 20 mV abweichende Basis-Emitter-Spannung bewirken – zusätzlich zum anfänglichen V_{BE} -Offset. In **Bild 3** ist eine aus diskreten Transistoren aufgebaute Current-Balancing-

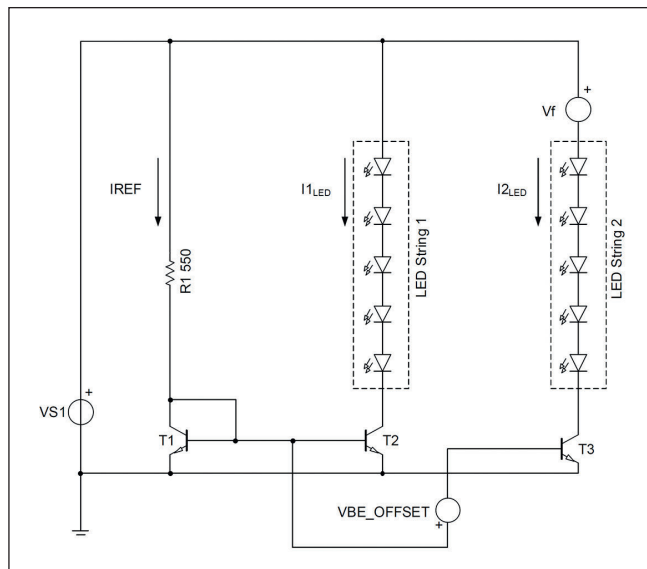


Bild 3: Dieses Schaltbild verdeutlicht die Auswirkungen von V_{BE} und V_F in einer Schaltung auf der Basis diskreter Transistoren.

© Texas Instruments

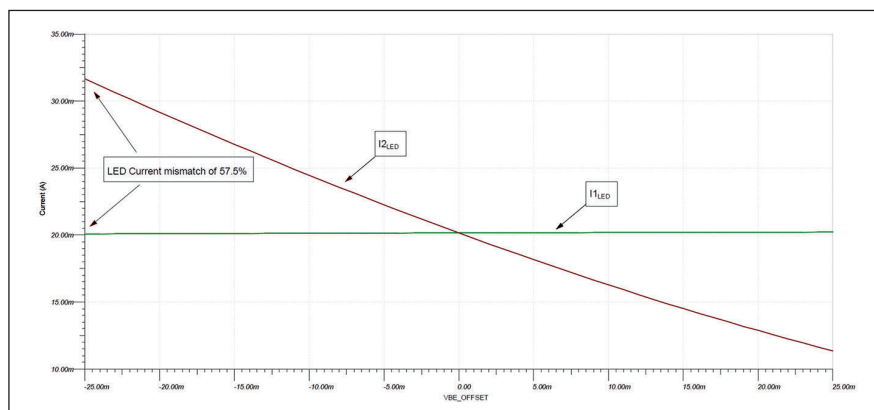


Bild 4: Auswirkungen unterschiedlicher V_{BE} -Werte in der Schaltung mit diskreten Transistoren

© Texas Instruments

Schaltung mit zwei Strings zu jeweils fünf LEDs dargestellt. Die Versorgungsspannung (VS1) beträgt 12 V . Mit R1 und dem als Diode konfigurierten Transistor T1 wird I_{REF} auf 20 mA bei Zimmertemperatur eingestellt. Die Spannungsquellen V_F und V_{BE_OFFSET} stehen für Unterschiede zwischen den Vorwärtsspannungen der LEDs sowie zwischen den V_{BE} -Werten der Transistoren. Im Idealfall sind diese Spannungsquellen in der Schaltung nicht vorhanden.

In **Bild 4** werden die Auswirkungen unterschiedlicher V_{BE} -Werte bei T2 und T3 auf die Schaltung in **Bild 3** deutlich. Verstellt man V_{BE_OFFSET} von -25 bis $+25 \text{ mV}$, so ändert sich I_{2LED} von $31,5$ auf $11,5 \text{ mA}$. Bei $V_{BE_OFFSET} = 0 \text{ V}$ besteht eine bis zu $57,5$ Prozent betragende Abweichung zwischen I_{1LED} und I_{2LED} vom Sollstrom von 20 mA . Wie Gleichung 1 verdeutlicht, hängt der LED-Strom von V_{T1BE} ab. Jede V_{BE} -Abweichung bewirkt daher einen Strom-Unterschied zwischen den LED-Strings, in den die anfänglichen Offsetfehler und temperaturbedingte Schwankungen eingehen.

Bild 5 zeigt die empfohlene Current-Balancing-Schaltung mit zwei Operationsverstärkern und zwei Strings aus je fünf LEDs. Die Werte der Bauelemente ergeben einen Strom von 20 mA in jedem Zweig. Um einen Vergleich zu ermöglichen, entsprechen die Variablen und Spannungsänderungen jenen, die auf die Schaltung aus **Bild 3** angewandt wurden.

In **Bild 6** ist zu erkennen, wie sich unterschiedliche V_{BE} -Spannungen bei T2 und T3 auf die in **Bild 5** gezeigte Schaltung auswirken. Verstellt man V_{BE_OFFSET} von -25 bis $+25 \text{ mV}$, so ändert sich der Strom I_{2LED} von $19,92101$ auf $19,921024 \text{ mA}$. Die $0,00004$ Prozent betragende Abweichung zwischen I_{1LED} und I_{2LED} von einem Soll-Strom von $19,921017 \text{ mA}$ bei einem V_{BE_OFFSET} -Wert von 0 V stellt eine Verbesserung im Vergleich zur Schaltung auf Basis diskreter Transistoren dar. Der Grund für diese Fehlerreduzierung liegt darin, dass mit der Regelschleife des Operationsverstärkers für einen konstanten Spannungsabfall an den Strommess-Widerständen gesorgt wird, damit sich der

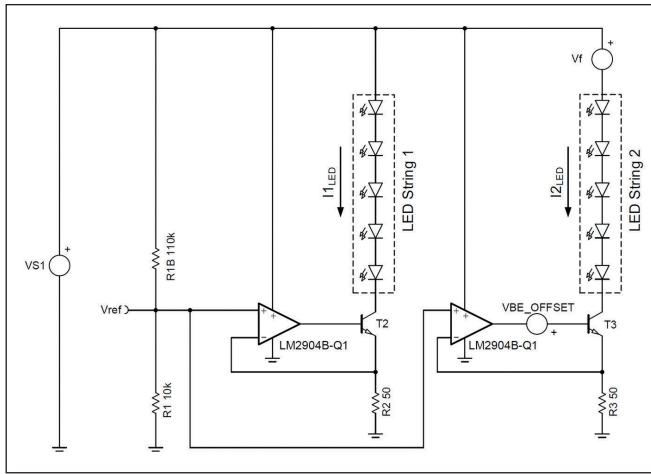


Bild 5: Auswirkungen von V_{BE} bei einer Schaltung auf Operationsverstärker-Basis © Texas Instruments

doch ist die Änderungsrate bei der Operationsverstärker-Lösung geringer. Wenn sich die Versorgungsspannung stark verändert, tritt bei der Schaltung mit diskreten Transistoren die größte Abweichung vom ursprünglichen Strom auf. Die Verwendung einer externen Spannungsreferenz zum Festlegen von I_{REF} in Bild 2 kann möglicherweise eine Spannungsreferenz mit höherem Ausgangsstrom erfordern, könnte dafür aber auch die Auswirkungen von Versorgungsspannungsänderungen reduzieren. Bei der Schaltung in Bild 4 wird V_{REF} durch eine Last mit geringer Stromaufnahme festgelegt.

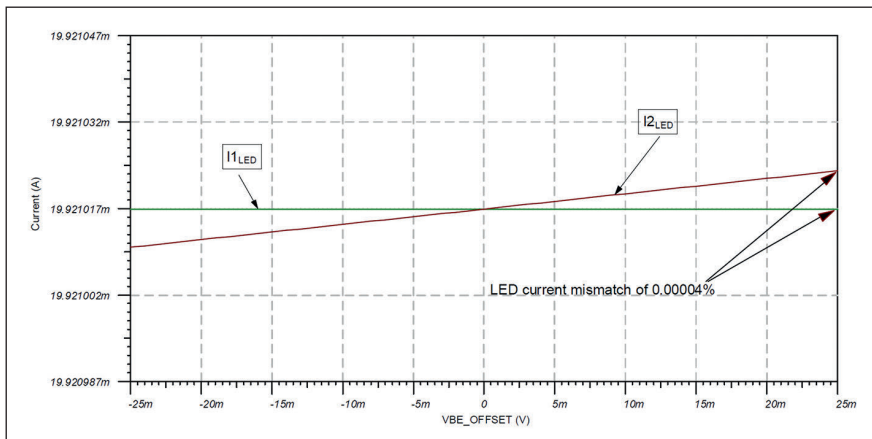


Bild 6: Auswirkungen von V_{BE} -Differenzen bei der Schaltung auf Operationsverstärker-Basis © Texas Instruments

gewünschte Strom von 20 mA einstellt.

Auswirkungen der Eigen Erwärmung auf LED-Ströme

Temperaturunterschiede auf der Leiterplatte und lokale Eigen erwärmungen haben deutliche Auswirkungen auf die Current-Balancing-Schaltungen für die LEDs. Weil die Auswirkungen der Eigen erwärmung bei den in Simulationen verwendeten Modellen von diskreten Transistoren und LED-Schaltungen nicht berücksichtigt werden, kommt dieser Effekt in den Simulationen nicht zum Tragen. Eine durch unterschiedliche Distanzen zur Wärmequelle hervorgerufene Temperaturdifferenz zwischen den Transistoren T2 und T3 kann dazu führen, dass die V_{BE} -Werte dieser Transistoren stark differieren. Dieser Unterschied bewirkt einen höheren Strom im wärmeren LED-String, was durch die höhere Verlustleistung die Temperatur weiter ansteigen lässt. Wird diese positive Rückkopplung nicht eingegrenzt, kann der gesamte Strom durch einen einzigen LED-String fließen, wodurch Transistor und LEDs zerstört werden. Wenn alle LED-Strings aus einer Quelle versorgt

werden, ist deshalb die Eigen erwärmung beim Design unbedingt zu berücksichtigen. Die auf Operationsverstärkern basierende Schaltung ist immun gegen Eigen erwärmung durch ungleiche Ströme, weil die an R2 und R3 liegende Spannung auf einen konstanten Wert geregelt wird. Sollte die Eigen erwärmung eines Transistors zu einer Drift von V_{BE} führen, passt die Regelung die Basisspannung des Transistors entsprechend an, sodass der Strom konstant bleibt. Natürlich weisen I2 und I3 eine gewisse Drift auf. Wenn die Offsetspannungs-Drift ein Problem darstellt, sollte u. U. auf einen driftärmeren Baustein umgestiegen werden.

Schwankungen in der Versorgungsspannung

Der I_{REF} Wert der Schaltung mit diskreten Transistoren und der V_{REF} Wert der Operationsverstärker-Schaltung sind von der Versorgungsspannung abhängig, sodass sich die Änderung der Versorgungsspannung hier proportional auf den Strom auswirkt. Bei beiden Varianten kommt es durch die Änderung der LED-Versorgungsspannung zu einer Änderung des LED-Stroms, je-

Auswirkungen der LED-Vorwärtsspannung

Prozessschwankungen, unterschiedliche Flächen oder Temperaturdifferenzen können dazu führen, dass die einzelnen LEDs verschiedene Vorwärtsspannungen aufweisen. Zusammengenommen haben diese Unterschiede zur Folge, dass auch die Vorwärtsspannungen der LED-Strings differieren. Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurde simuliert, wie die auf diskreten Transistoren beruhenden Schaltung und Operationsverstärker-Schaltung reagieren, wenn die Vorwärtsspannung V_f von -1 bis $+1$ V variiert wird. Hiermit wurde ein Unterschied der Vorwärtsspannungen von LED-String 1 und LED-String 2 emuliert. Wie sich dabei zeigte, variiert der LED-Strom bei der transistorbasierten Schaltung um $350 \mu A$, während er bei der Operationsverstärker-Schaltung weitgehend konstant bleibt.

Schlussfolgerungen

Der Vergleich der beiden Current-Balancing-Schaltungen für LED-Strings zeigte, wie sich Unterschiede zwischen den Bauteilen sowie Temperatur und Versorgungsspannung auswirken. Die Operationsverstärker-Schaltung kann prozess- und temperaturbedingte Änderungen von V_{BE} ausgleichen. Zudem ist sie weniger empfindlich gegen unterschiedliche Versorgungsspannungen und LED-Vorwärtsspannungen. ■ (eck)

www.ti.com



Sanjeev Manandhar arbeitet als Systems Engineer bei Texas Instruments. © Texas Instruments